

渗透处理对冷冻干燥罗非鱼肉品质和肌原纤维蛋白的影响

韦丽娜^{1,2}, 李来好², 郝淑贤², 黄卉², 杨贤庆², 相欢², 赵永强², 岑剑伟², 魏涯²

1. 广东海洋大学食品科技学院, 广东湛江 524088

2. 中国水产科学研究院南海水产研究所/农业农村部水产品加工重点实验室/国家水产品加工技术研发中心, 广东广州 510300

摘要: 为探究渗透处理在提升罗非鱼肉冷冻干燥效率、改善干制品复水后品质的影响, 为罗非鱼肉冷冻干燥产品开发提供理论支持, 使用食盐、丙二醇、复合渗透剂(食盐+丙二醇)预处理罗非鱼肉, 再结合烫漂处理后进行冷冻干燥, 分析了渗透剂预处理对其肉蒸煮损失、冷冻干燥特性、复水率和肌原纤维蛋白特性的影响。结果表明食盐、丙二醇和复合渗透剂均能降低罗非鱼肉的蒸煮损失, 提高其干燥效率。复合渗透处理冷冻干燥用时最短(19 h), 食盐和丙二醇渗透处理后鱼肉干燥时间(20 h)较对照组(24 h)明显缩短。丙二醇与复合渗透剂显著提高了干制鱼肉的复水性($P<0.05$), 其中丙二醇渗透处理干制鱼肉的复水率最高(71.11%), 较对照组有显著提高($P<0.05$)。食盐渗透对干制鱼肉复水后的质构影响显著($P<0.05$), 其中对硬度和弹性影响最大, 分别为(94.3±3.9) g和(3.44±0.23) mm; 丙二醇添加对鱼肉硬度无显著影响, 但可提高鱼肉弹性。添加食盐加速肌原纤维蛋白氧化, 肌原纤维蛋白质量浓度和巯基质量摩尔浓度分别下降0.32 mg·mL⁻¹和0.47 μmol·g⁻¹, 表面疏水性和羰基质量摩尔浓度分别增加4.10 μg和0.23 nmol·mg⁻¹; SDS-PAGE电泳图谱显示肌球蛋白重链条带发生降解消失; 丙二醇渗透保护剂减缓预冻过程中冰晶生成, 抑制蛋白氧化, 离子键和氢键质量浓度分别提高了0.65和0.33 mg·mL⁻¹, 二硫键质量浓度降低($P<0.05$), 提高了蛋白稳定性。因而食盐和丙二醇复配使用可有效抑制加工过程中的蛋白氧化, 保持干制鱼肉复水后良好的食用口感。综合考虑, 真空冷冻干燥前可采用复合渗透处理罗非鱼肉。

关键词: 罗非鱼肉; 渗透处理; 真空冷冻干燥; 干燥效率; 肌原纤维蛋白

中图分类号: TS 254.4

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effect of osmosis treatment on meat quality and myofibrillar protein of freeze-dried tilapia

WEI Lina^{1,2}, LI Laihao², HAO Shuxian², HUANG Hui², YANG Xianqing², XIANG Huan², ZHAO Yongqiang², CEN Jianwei², WEI Ya²

1. College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China

2. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences/Key Laboratory of Aquatic Product Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/National R&D Center for Aquatic Product Processing, Guangzhou 510300, China

Abstract: In order to explore the effect of osmotic treatment on improving the freeze-drying efficiency of tilapia meat and the quality of dried products after rehydration, and to provide theoretical supports for the development of freeze-dried tilapia meat

收稿日期: 2022-09-25; 修回日期: 2022-10-20

基金项目: 国家现代农业产业技术体系(CARS-46); 广东省重点领域研发计划项目(2019B020225001); 中国水产科学研究院基本科研业务费专项资金(2020TD69); 中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助(2020CY03, 2021SD06)

作者简介: 韦丽娜(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水产品加工与质量安全。E-mail: 1823627809@qq.com

通信作者: 李来好(1963—), 男, 研究员, 博士, 研究方向为水产品加工与质量安全。E-mail: laihali@163.com

郝淑贤(1972—), 女, 研究员, 博士, 研究方向为水产品加工与质量安全。E-mail: susanhao2001@163.com

products, we pretreated the tilapia meat with salt, propylene glycol and compound penetrant (Salt+propylene glycol), followed by blanching and freeze-drying. Then we analyzed the effects of penetrant pretreatment on the cooking loss, freeze-drying characteristics, rehydration rate and myofibrillar protein characteristics of tilapia meat. The results show that salt, propylene glycol and composite penetrant could reduce the cooking loss and improve the drying efficiency of tilapia meat. The freeze-drying time of composite osmotic treatment was the shortest (19 h), and the drying time of fish after the salt and propylene glycol osmotic treatment was 20 h, which was significantly shorter than that of the control group (24 h). The propylene glycol and composite penetrant improved the rehydration of dried fish significantly ($P<0.05$), and the rehydration rate of dried fish treated with propylene glycol was the highest (71.11%), which was significantly higher than that of the control group ($P<0.05$). Salt penetration had a significant effect on the texture of dried fish after rehydration ($P<0.05$), among which hardness and elasticity had the greatest effects [(94.3±3.9) g and (3.44±0.23) mm, respectively]. Propylene glycol had no significant effects on the hardness of fish, but could improve the elasticity. The addition of salt accelerated the oxidation of myofibrillar protein, and the contents of myofibrillar protein and sulfhydryl decreased 0.32 mg·mL⁻¹ and 0.47 μmol·g⁻¹, respectively, while the surface hydrophobicity and carbonyl content increased 4.10 μg and 0.23 nmol·mg⁻¹, respectively. SDS-PAGE shows that the myosin heavy chain band disappeared. Propylene glycol osmotic protective agent slowed down the formation of ice crystals and inhibited the protein oxidation during pre-freezing. The mass concentrations of ionic bond and hydrogen bond increased by 0.65 mg·mL⁻¹ and 0.33 mg·mL⁻¹, respectively, the mass concentration of disulfide bond decreased ($P<0.05$), which improved the protein stability. Therefore, the compound penetrant can inhibit the protein oxidation effectively during the processing process and keep good taste of dried fish after rehydration, which is suitable for the pretreatment of tilapia before vacuum freeze-drying.

Keywords: Tilapia meat; Infiltration treatment; Vacuum freeze drying; Drying efficiency; Myofibrillar protein

罗非鱼肉质细嫩, 骨刺少, 富含蛋白质和多种氨基酸, 含脂量低^[1-2], 深受消费者欢迎。但因水分含量高, 容易受酶和微生物的影响而发生腐败变质^[3], 常温条件下无法保存, 目前多以生鲜食用和冷冻加工为主^[4]。

随着现代消费模式的改变, 人们对方便速食产品的需求逐渐增加。对鱼肉进行加工, 使之便于室温存放, 满足开袋即食或冲泡即食的需求成为当前研究热点之一。真空冷冻干燥作为一种条件温和的干燥方式成为本研究的首选。真空冷冻干燥适用于热敏性成分原料(果蔬和水产品)的干燥, 但因时间长、效率低、能耗高等因素限制了其在水产品中的应用。

研究表明用非热预处理或热处理后再干燥, 可在一定程度上提高原料的干燥效率和干制品的复水性^[5-6]。渗透脱水是一种非热预处理手段, 其利用细胞内外部渗透压, 促使水分迁移, 改变原料对自由水的束缚能力, 从而影响原料的干燥效率^[7]。食盐是常用的渗透剂之一。食盐腌制不仅可降低水分含量、延缓烹饪损失、加速肌苷酸的生成并赋予产品主要滋味, 还提升了整体感官品质。但食盐摄入过多会造成健康问题, 有研究转向了低盐(质量分数 1.5%~2.0%)腌制^[8], 在低盐环境下添加复合渗透剂一定程度上弥补了因食盐用量过低导致的品质下降问题^[9];

张芸等^[10]发现糖醇代替部分盐腌制处理, 鱼肉的出品率、持水性明显提高, 细胞保持完整; 郑曼^[11]研究表明丙二醇+丙三醇+氯化钠(NaCl)预处理可提高罗非鱼片的干燥速率和复水性。

笔者项目组在前期研究中发现热处理提高了细胞通透性, 使细胞持水力下降, 干燥时可加快水分散失并显著提升干燥速率和复水性^[12-13]。姚娜娜等^[14]研究表明添加剂和热处理均缩短了大果沙棘(*Hippophae rhamnoides*)的干燥时间。目前有关热处理与非热处理相结合提升水产品干燥特征的研究尚未见报道。本研究以热处理样品为对照, 分析了热处理与非热处理联合对提升干燥速率及复水性的影响, 探讨了渗透剂对鱼肉冷冻干燥的影响机制, 以为罗非鱼肉冷冻干燥产品开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜罗非鱼(每尾 400~500 g), 购于广州超市。

食用盐(广东省广盐集团股份有限公司); 丙二醇(食品级, 美媛生物科技有限公司); 蛋白测定试剂盒、总巯基、羰基含量测定试剂盒(南京建成生物工程研究所); 12% (体积分数) Bis-Tris 预制胶、SDS 电泳缓冲液(20×)(上海英潍捷基贸易有限公司); 预染蛋白分子量标准(6.5~270 kD)、SDS-

PAGE 蛋白上样缓冲液 (5×)、考马斯亮蓝染色液 (上海碧云天生物技术有限公司)。

1.2 仪器与设备

CR-400 色差计 (日本柯尼卡美能达控股公司); Alpha1-4 真空冷冻干燥机 (德国 Christ 公司); H1850R 台式高速冷冻离心机 (湘仪离心机仪器有限公司); BS124S 电子天平 (德国 Sartorius 公司); HH-4 快速恒温数显水箱 (常州澳华仪器公司); CT3 质构仪 (美国 Brookfield 公司); Mini Gel Tank PAGE 电泳槽 (美国赛默飞科技公司); Sunrise-basic Tacan 酶标仪 (瑞士 TECAN 公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 原料预处理

取罗非鱼背部肌肉, 切成 3 cm×3 cm×1 cm 的小块, 质量约为 12 g, 吸干鱼肉表面水分, 在 4 ℃ 条件下浸渍预处理 1 h, 浸渍液 (质量分数) 分别为: 1.5% 食盐、3% 丙二醇、1.5% 食盐+3% 丙二醇, 对照组不做任何处理。浸渍结束后滤纸吸去鱼肉表面水分, 100 ℃ 沸水烫漂 1 min, 滤纸吸去表面水分后进行真空冷冻干燥。真空冷冻干燥: -40 ℃ 冰箱预冻 12 h, 真空冷冻干燥冷阱温度 -40 ℃, 真空度 20 Pa。

1.3.2 蒸煮损失

鱼肉经 100 ℃ 沸水烫漂 1 min 取出, 吸干表面水分, 然后准确称质量, 烫漂前后鱼肉质量差与烫漂前质量之比即为蒸煮损失率。

$$R_{cl} = \frac{m_b - m_a}{m_b} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R_{cl} 为蒸煮损失率; m_b 、 m_a 分别为烫漂前后鱼肉的质量 (g)。

1.3.3 干燥曲线

参考崔清亮等^[15]的方法, 略作修改。测定干燥过程罗非鱼肉的质量, 至含水率约 5% 时停止干燥, 计算含水率和样品干燥速率。

$$M = \frac{m_t - m_0}{m_t} \times 100\% \quad (2)$$

$$R_d = \frac{M_t - M_{t+4}}{\Delta t} \quad (3)$$

式中: M 为含水率 (%); m_t 为不同时间段样品质量 (g); m_0 为最终干燥后质量 (g); R_d 为干燥速率 (%·h⁻¹); M_t 为不同时间段样品含水率 (%); M_{t+4} 为 (t+4) h 样品含水率 (%); Δt 为 4 h。

1.3.4 复水率

参考刘书成等^[16]的方法, 略做修改。干制样

品 80 ℃ 水浴锅复水 60 min, 每 10 min 测一次质量。

$$R_r = \frac{m_1 - m_0}{m_1} \times 100\% \quad (4)$$

式中: R_r 为复水率 (%); m_0 、 m_1 为复水前后鱼肉的质量 (g)。

1.3.5 白度

参考 Chen 等^[17]的方法, 略做修改。干制鱼肉白度 (W_n) 采用色差仪测定, 室温下测定干样品的 L^* 、 a^* 、 b^* 值。 L^* 为明度, 正值表示偏白, 负值表示偏黑; a^* 为红绿值, 正值表示偏红, 负值表示偏绿; b^* 为黄蓝值, 正值表示偏黄, 负值表示偏蓝。

$$W_n = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (5)$$

1.3.6 质构的测定

用质构仪测定复水后鱼肉样品的硬度、弹性、咀嚼性和内聚性, 参考吴燕燕等^[18]的方法。每组实验重复 6 次。

1.3.7 肌原纤维蛋白分析

1) 肌原纤维蛋白的提取和分析

参考崔燕等^[19]的方法, 称 2.0 g 干制鱼肉, 加入 20 mL 预冷 Tris-maleate 缓冲溶液 (50 mmol·L⁻¹ KCl-20 mmol·L⁻¹ Tris-maleate, pH 7.0), 充分匀浆, 4 ℃ 冷冻离心 (10 000 r·min⁻¹, 10 min), 除上清液, 沉淀中加入 20 mL 预冷 Tris-maleate 缓冲溶液 (0.6 mol·L⁻¹ KCl-20 mmol·L⁻¹ Tris-maleate, pH 7.0), 匀浆后 4 ℃ 静置提取 1 h, 4 ℃ 冷冻离心 (10 000 r·min⁻¹, 10 min), 上清液为肌原纤维蛋白溶液。Bradford 法测定肌原纤维蛋白溶液浓度。

表面疏水性的测定参考 Iiham 等^[20]的方法, 20 mmol·L⁻¹ pH 6.0 的磷酸缓冲液将肌原纤维蛋白稀释至 2 mg·mL⁻¹, 取 1 mL 稀释液加 100 μL (1 mg·mL⁻¹) 溴酚蓝混合均匀, 并做空白对照, 涡旋震荡 10 min, 4 ℃ 冷冻离心 (3 000 r·min⁻¹, 15 min), 上清液稀释 50 倍, 用酶标仪在 595 nm 波长下测定吸光值。

$$A_{BPP} = 200 \times \frac{(OD_c - OD_s)}{OD_c} \quad (6)$$

式中: A_{BPP} 为溴酚蓝结合量 (μg); OD_c 、 OD_s 分别为对照组和样品的吸光值。

巯基、羰基按照总巯基测定试剂盒、羰基含量测定试剂盒说明书进行测定。

2) 分子间的作用力

测定鱼肉样品肌原纤维蛋白分子间作用力, 参考 Pan 等^[21]方法。鱼肉样品分别与不同缓冲溶液

按 1 : 19 体积比进行均质匀浆, 缓冲溶液分别包括 SA ($50 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaCl}$)、SB ($600 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaCl}$)、SC ($600 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaCl}+1.6 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 尿素)、SD ($600 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaCl}+8 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 尿素)、SE ($600 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaCl}+8 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 尿素+ $1.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ β -巯基乙醇)。4 $^{\circ}\text{C}$ 静置 1 h, $10\,000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min, 测定上清液蛋白溶液浓度确定离子键 (SB-SA)、氢键 (SC-SB)、疏水相互作用 (SD-SC)、二硫键 (SE-SD) 质量浓度。

3) SDS-PAGE 凝胶电泳分析

按 3 : 1 体积比将肌原纤维蛋白与 SDS-PAGE 上样缓冲液 (5 \times) 混合, 混合液沸水浴煮 5 min, 取 10 μg 混合体系, 在 12% (体积分数) Bis-Tris 预制胶进行上样分析, 电泳电压 120V, 电泳时间约 1 h, 电泳结束, 用考马斯亮蓝染色液对胶板进行染色、然后脱色, 扫描蛋白条带进行分析。

1.4 数据分析

每组实验均取 3 次平行进行测定, 采用 SPSS 19.0 软件对实验数据进行处理与显著性分析, 结果以“平均值 \pm 标准差 ($\bar{X}\pm\text{SD}$)”表示, 用 Duncan's 法进行组间多重比较, 显著性水平 $P<0.05$, 使用 Origin 8.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 蒸煮损失

蒸煮损失可反映肉制品的保水性能^[22]。热处理后样品质量均有减轻, 原因是可溶性化合物溶出、脂肪水解和水分流失, 其中水分流失是导致质量减轻的主要原因^[23]。如图 1 所示, 与对照组相比, 不同渗透处理均可降低鱼肉的蒸煮损失 ($P<0.05$), 复合渗透剂对蒸煮损失的影响与单一食盐渗透的效果无显著性差异 ($P>0.05$)。烫漂过程中蛋白质发生热变性, 持水力下降, 造成质量下降, 蒸煮损失增大。而经过渗透处理可改变鱼肉蛋白与水的结合状态或结合程度, 从而降低产品蒸煮损失。吴亮亮等^[24] 研究发现低浓度食盐具有保水作用, 食盐添加使不易流动水与肌原纤维蛋白的结合程度增加, 引起肌原纤维溶胀, 保水性增强; 李雨露和刘丽萍^[25] 发现食盐质量分数低于 3% 的保水性较强。丙二醇是二羟基化合物, 具有良好的亲水性和吸湿性, 烫漂过程中鱼肉细胞在汁液流失后从环境中吸收一部分水分, 降低蒸煮损失^[26]。

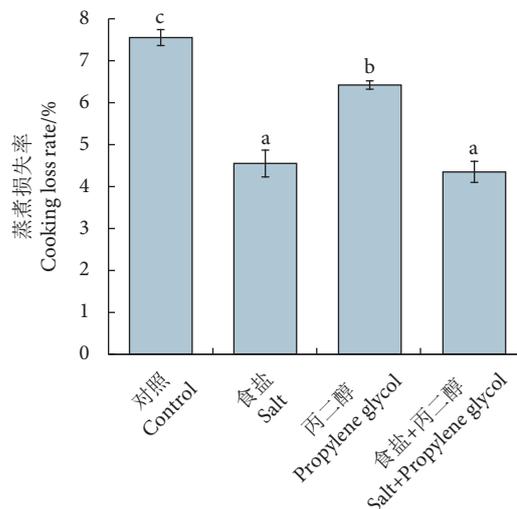


图1 渗透处理对蒸煮损失的影响

注: 字母不同表示差异显著 ($P<0.05$), 图 3 同此。

Fig. 1 Effect of osmosis treatment on cooking loss of fish
Note: Different letters indicate significant differences ($P<0.05$). The same case in Fig. 3.

2.2 干燥速率曲线

罗非鱼肉含水率随干燥时间的延长逐渐降低, 8~12 h 处理组含水率下降显著 (图 2-a)。与对照组相比, 渗透处理的罗非鱼肉含水率下降趋势更显著, 3 组渗透处理的鱼肉干燥过程含水率变化趋势表现出相似性, 干燥期间含水率差异不明显。鱼肉经渗透剂处理后, 样品水分质量分数达到 5% 时所需时间较对照组缩短约 4~5 h。由于渗透溶液中溶质的填充作用, 肌肉内部与外部水分形成较好的水分扩散通道, 从而促进了水分的去除^[27-28]。

如图 2-b 所示, 前期干燥速率处于加速阶段, 第 12 小时最高, 随后随时间的延长而降低。复合渗透处理 19 h, 食盐和丙二醇渗透处理组第 20 小时鱼肉含水率低于 5%, 此时对照组含水率为 12.72%, 说明渗透处理可使样品干燥的时间明显缩短。真空冷冻干燥前期的干燥速率高是因为添加物渗透作用, 细胞内外为了维持渗透压平衡, 胞内水分流出集中在细胞间隙, 水分流失快; 细胞内水分与大分子结合, 不易流失, 因而解吸阶段主要是结合水的升华, 干燥速率降低。干燥速率随干燥时间的延长而降低, 也有部分原因是水分从物料内部向表面的迁移速率与物料表面的水分蒸发速率的不一致^[29]。食盐渗透处理的干燥速率略低于其他两组, 可能同食盐与细胞内水分结合、传质推动力减弱使干燥速率下降有关^[30], 食盐渗入增加了物料内部的含水量, 影响了水分的扩散和蒸发。

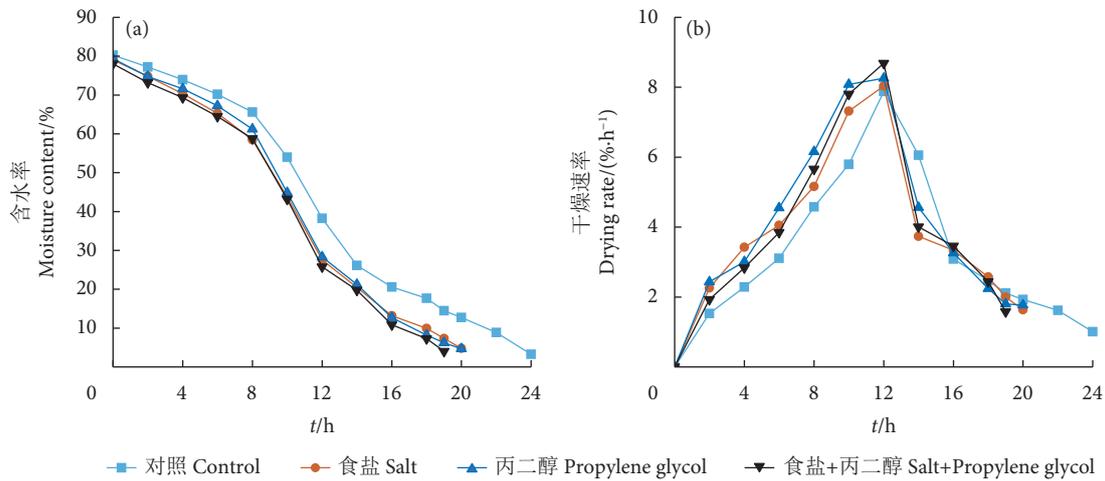


图2 渗透处理对干燥速率曲线的影响

Fig. 2 Effect of infiltration treatment on drying rate curve

2.3 复水率

复水是干制品食用前的一个重要操作，复水率与细胞和结构的破坏程度密切相关。由图 3 可知，丙二醇与复合渗透剂可显著提高干制鱼肉的复水性 ($P < 0.05$)，丙二醇渗透处理的复水率最高 (71.11%)，而经过食盐渗透处理则明显降低了干制鱼块的复水性。复水率降低是因为 NaCl 使蛋白质变性发生交联，肌肉组织收缩^[31]，增加了鱼肉在干燥过程中的组织损伤，干制后鱼块的肌肉纤维组织具有致密性，吸水能力减弱不利于复水^[32]。韩珍琼和马菁^[33]研究发现食盐渗入会破坏荷兰豆 (*Pisum sativum* var. *saccharatum*) 细胞组织，造成细胞质壁分离，引起脱水，从而使干制品复水性下降。丙二醇因其含有羟基基团，具有良好的亲水性，吸水能力强，

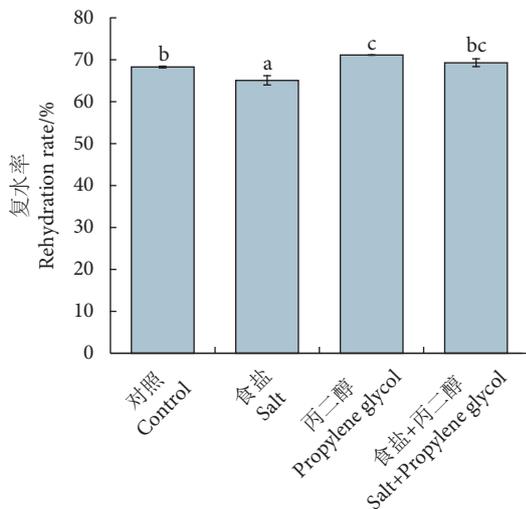


图3 渗透处理对干制罗非鱼块复水率的影响

Fig. 3 Effect of osmotic treatment on rehydration rate of dried tilapia fillets

复水率高^[34]；复合渗透剂中丙二醇对肌肉组织吸水作用力强，减弱肌肉组织的收缩性，减小组织结构的变形，有效维持细胞的完整性，因而复水率高。

2.4 冻干罗非鱼品质测定

由表 1 可知，与对照组相比，添加食盐干制鱼肉白度显著降低 ($P < 0.05$)，丙二醇和复合渗透剂对鱼肉颜色的影响不显著 ($P > 0.05$)。单独食盐处理的鱼肉褐变严重，实验观察到干制鱼肉表面呈微黄色。鱼肉的白度与鱼体内的水分和氧化发生有关，食盐添加使鱼块肌肉脱水、收缩，光折射减弱，造成鱼块色泽变暗，盐渍过程会加速脂质氧化，也可能与 NaCl 促进氧化使肌红蛋白氧化生成褐色的高铁肌红蛋白有关^[35]，腌制时间越长与环境中的氧长时间接触使 L^* 下降^[36]；丙二醇有良好的亲水性，可提高鱼肉持水力和降低氧化，能有效抑制血红蛋白氧化，因而丙二醇和复合渗透剂对鱼肉白度影响不显著。

与对照组相比，添加食盐对鱼肉复水后的质构影响显著 ($P < 0.05$)，硬度和弹性增加，内聚性减弱；丙二醇添加对鱼肉硬度和内聚性无显著性影响，但提高了鱼肉的弹性。食盐腌制有利于产品产生高弹性、耐咀嚼^[37]；吴素娟等^[38]研究发现鱼肉腌制后硬度、弹性增加。NaCl 增大离子强度，改变肌原纤维蛋白分子表面的电荷分布，从而改变蛋白质结构，多肽链的交互作用增强，提高了凝胶特性^[39]。适盐浓度有利于形成蛋白质凝胶网络，提高鱼肉制品的质构^[40-41]。丙二醇分子式中含有吸水基团羟基，具有高复水性，因而对复水后组织硬度影响不显著；醇类渗透液进入到肌肉组织内部，使

表1 渗透处理对于制鱼肉白度和复水后质构的影响
Table 1 Effect of osmotic treatment on whiteness and texture of dried fish after rehydration

处理 Treatment	白度 Whiteness	硬度 Hardness/g	弹性 Elasticity/mm	咀嚼性 Chewability/mJ	内聚性 Cohesion
对照 Control	20.4±0.85 ^b	81.0±4.2 ^a	2.87±0.18 ^a	1.58±0.35 ^a	0.69±0.08 ^b
食盐 Salt	14.90±1.01 ^a	94.3±3.9 ^b	3.44±0.23 ^b	2.01±0.06 ^b	0.50±0.01 ^a
丙二醇 Propylene glycol	21.43±0.62 ^b	82.3±4.5 ^a	3.21±0.27 ^b	1.55±0.08 ^a	0.63±0.09 ^b
食盐+丙二醇 Salt+Propylene glycol	19.49±0.81 ^b	92.8±4.5 ^b	3.37±0.24 ^b	2.27±0.05 ^b	0.68±0.02 ^b

注：同列字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)；下表同此。

Note: Different letters with in the same column indicate significant differences ($P<0.05$). The same case in the following table.

得肌肉间隙变小，提高鱼片的弹性及口感。复合渗透剂综合了食盐和丙二醇的特点，联合作用对鱼肉的硬度、弹性和咀嚼性均有提高，赋予鱼肉复水后良好的口感。

2.5 肌原纤维蛋白特性的测定

2.5.1 肌原纤维蛋白

渗透剂处理对鱼肉肌原纤维蛋白含量的影响显著。食盐腌制使鱼肉肌原纤维蛋白和总巯基质量摩尔浓度显著下降 ($P<0.05$)，表面疏水性和羰基质量摩尔浓度上升 (表 2)。食盐增加了离子强度，影响蛋白质的表面电荷，从而促进肌原纤维蛋白溶解^[42]；黄彬等^[43] 研究发现盐水煮使鸡肉盐溶性蛋白含量降低，腌制过程食盐引起肌肉中蛋白质的氧化修饰，影响表面疏水性和羰基含量。同时 Na^+ 和 Cl^- 进入细胞组织，破坏细胞内静电平衡，引起肌肉中蛋白质的氧化修饰，构象发生改变，使蛋白质表面的氨基酸残基受到攻击形成羰基^[44-45]，蛋白质分子之间的相互交联，促进巯基氧化为二硫键。

与对照组相比，丙二醇处理的肌原纤维质量浓度显著升高 ($P<0.05$)，说明添加物具有抑制蛋白氧化的作用。沈春蕾等^[46] 研究表明虾仁经糖醇渗透处理后冻藏，贮藏过程中抑制蛋白巯基氧化转化为二硫键，维持肌肉中肌原纤维蛋白稳定；二羟基醇与肌肉组织中的水分子和蛋白质通过形成氢键而发

生结合，起到稳定肌原纤维蛋白结构的作用，从而维持蛋白质功能特性，降低空间构象变化，确保蛋白质的二级和三级结构稳定。羟基与蛋白质大分子结合，使肌纤维蛋白质溶液中自由水转为结合水，因而降低肌纤维蛋白的共晶点温度，减少冰晶形成，抑制疏水性基团的释放、减缓肌原纤维蛋白质表面疏水性的增加、影响肌纤维蛋白质巯基含量，从而减弱蛋白质分子的聚集和降低蛋白质变性程度^[47-48]，提高鱼肉持水性，保持鱼肉品质。复配处理也有效减缓了对蛋白的氧化降解，延缓鱼肉肌原蛋白的冷冻变性，表面疏水性和羰基含量低于单一食盐添加组，提高蛋白稳定性。有研究表明，醇与 NaCl 复配使用显著提高了干制罗非鱼片的 Ca^{2+} -ATP 酶活性和盐溶性蛋白溶解度，降低了蛋白质变性，减少了营养成分流失，从而改善了干鱼片品质^[11]。

2.5.2 分子间化学作用力

离子键和氢键是维持肌原纤维蛋白天然结构的主要作用力，二者的键合力弱于疏水相互作用和二硫键^[49]，易受环境影响使结构发生改变。预处理和冷冻干燥过程对肌肉蛋白质产生了影响，维持蛋白质结构的化学作用力发生了一定的改变。范露等^[50] 研究表明火腿的腌制、发酵过程影响了蛋白质的结构和相互作用力，其离子键和氢键相对含量下降，

表2 渗透处理对肌原纤维蛋白特性的影响
Table 2 Effect of osmotic treatment on myofibrillar protein properties

处理 Treatment	肌原纤维质量浓度 Myofibrillar mass concentration/(mg·mL ⁻¹)	表面疏水性 Surface hydrophobicity/ μg	总巯基质量摩尔浓度 Total Thiol molality/ (μmol·g ⁻¹)	羰基质量摩尔浓度 Carbonyl molality/ (nmol·mg ⁻¹)
对照 Control	4.22±0.09 ^b	23.73±1.32 ^b	3.32±0.05 ^c	2.42±0.09 ^b
食盐 Salt	3.90±0.12 ^a	27.83±1.02 ^c	2.85±0.17 ^a	2.65±0.42 ^c
丙二醇 Propylene glycol	4.79±0.05 ^c	20.74±1.71 ^a	4.11±0.26 ^d	1.97±0.13 ^a
食盐+丙二醇 Salt + Propylene glycol	4.16±0.07 ^b	22.75±1.22 ^{ab}	3.15±0.13 ^b	2.50±0.29 ^b

疏水相互作用和二硫键相对含量上升。

与对照组相比(图4), 食盐处理的离子键和氢键质量浓度显著降低($P<0.05$), 疏水相互作用和二硫键质量浓度增加, 表明食盐腌制破坏蛋白结构。离子键和氢键含量降低可能与食盐渗透作用导致细胞内汁液和细胞间水分的流失有关, 鱼肉腌制过程中离子键和氢键断裂, 含量降低^[50]; 渗透过程蛋白发生聚集产生交联作用^[51], 内部的疏水性基团暴露在蛋白质分子表面, 使蛋白质表面疏水性发生改变, 肌原纤维蛋白空间结构改变, 巯基暴露被氧化生成二硫键^[52-53]。

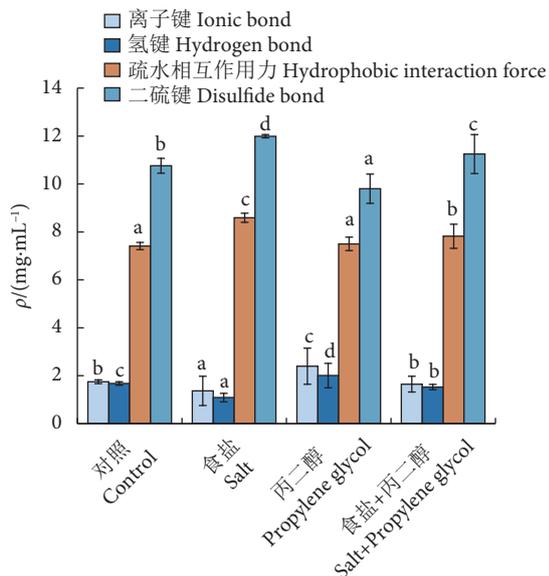


图4 渗透处理对肌原纤维蛋白分子间化学作用力的影响
注: 同色方柱不同字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

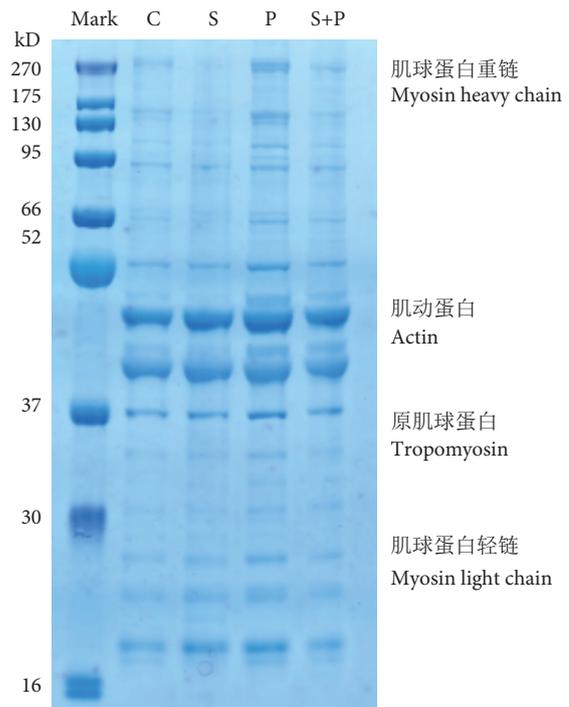
Fig. 4 Effect of osmotic treatment on intermolecular chemical force of myofibrillar protein

Note: Different letters on the same color bar indicate significant difference among the groups ($P<0.05$).

与对照组相比, 添加丙二醇的离子键和氢键质量浓度显著提高($P<0.05$), 二硫键质量浓度显著降低($P<0.05$), 蛋白稳定性提高。亲水性添加剂可以与水分子氢键结合, 增强氢键作用力^[54], 蛋白质表面的部分水分子被代替, 减少蛋白质氢键连接点的暴露, 使蛋白质高级结构维持稳定; 羟基醇通过与大分子结合在极性条件下具有蛋白保护作用, 预冻过程中抑制冰晶体的形成, 延缓组织中蛋白质的降解和变性。复合渗透剂中丙二醇与水结合力增强, 蛋白质分子聚集减弱, 抑制疏水基团释放, 蛋白质变性程度降低, 细胞组织结构稳定, 复合渗透剂有效保护肌纤维排列的有序性, 维持蛋白质构象。

2.5.3 SDS-PAGE

肌原纤维蛋白主要包含肌球蛋白重链、肌动蛋白、原肌球蛋白和一些调节性结构蛋白。对照组和复合渗透处理的鱼肉中肌球蛋白重链和一些大分子蛋白条带(95~270 kD)变浅, 单独食盐渗透处理组鱼肉肌球蛋白重链和一些大分子条带消失, 单一丙二醇渗透处理的肌原纤维蛋白条带效果最好(图5)。说明经过食盐渗透处理肌原纤维蛋白发生了一定程度的降解, 这与吴林洁等^[55]的研究结果一致。有研究表明添加 NaCl 可使蛋白质部分结构展开, 变性焓值降低^[56], 蛋白发生降解, 肌球蛋白重链消失和一些大分子条带变浅。丙二醇渗透剂形成的“玻璃态”可抑制冰晶的形成^[57], 抑制蛋白质的降解, 减轻对蛋白质结构的破坏。混合处理组蛋白条带丰度虽不及单一醇处理组, 与对照组相比无明显减弱迹象, 但明显高于盐处理组样品。



C. 对照; S. 食盐; P. 丙二醇; S+P. 食盐+丙二醇。

C. Control; S. Salt; P. Propylene glycol; S+P. Salt + Propylene glycol.

图5 渗透处理对鱼肉肌原纤维蛋白SDS-PAGE的影响
Fig. 5 Effect of osmotic treatment on SDS-PAGE in fish myofibrillar protein

3 结论

渗透处理可有效降低蒸煮损失, 提高干燥速率。与对照组(24 h)相比, 复合渗透剂处理的鱼肉冷冻干燥时间最短(19 h), 食盐和丙二醇渗透处理后干燥时间明显缩短(20 h)。

食盐腌制的鱼肉复水后硬度提高, 具有较好的咀嚼性, 但食盐会破坏蛋白结构, 使蛋白分子展开, 促进二硫键的形成, 使巯基和总巯基浓度降低, 导致蛋白质变性, SDS-PAGE 中肌球蛋白重链消失和其他大分子蛋白条带变浅。丙二醇渗透处理后干制品复水效果最佳, 复水后鱼肉的弹性提高, 且具有良好的口感, 丙二醇中的羟基对蛋白有保护作用, 减少了蛋白氧化变性。

复合渗透处理综合了盐和丙二醇处理的优势, 复合处理后可有效减少蒸煮损失, 在提高产品干燥速率的同时, 保持了干制品良好的色泽, 并提高了复水后鱼肉的硬度、弹性和咀嚼性; 同时起到降低蛋白氧化程度、维持蛋白结构稳定的作用, 可作为鱼肉冷冻干燥渗透处理的首选。

参考文献:

- [1] 袁圆玥, 岑剑伟, 李来好, 等. 二氧化碳麻醉对罗非鱼生理及品质的影响 [J]. 南方水产科学, 2022, 18(4): 147-155.
- [2] 吴燕燕, 赵志霞, 李来好, 等. 添加外源酶类对腌制罗非鱼品质的影响 [J]. 南方水产科学, 2018, 14(4): 102-111.
- [3] 罗静, 李敏, 张莹, 等. 电子鼻结合 GC-MS 分析不同干燥方式对罗非鱼片挥发性风味成分的影响 [J]. 南方水产科学, 2022, 18(1): 135-143.
- [4] 于福田, 岑剑伟, 李来好, 等. 罗非鱼片微酸性电解水杀菌工艺响应面法优化研究 [J]. 南方水产科学, 2019, 15(1): 77-84.
- [5] 金听祥, 王广红, 彭钰航, 等. 不同预处理方式对胡萝卜热泵干燥品质的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(7): 173-178.
- [6] 罗燕, 黄晓鹏, 李声元, 等. 预处理方式对枸杞子热风 and 远红外干燥下品质的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(6): 159-169.
- [7] 肖广健, 刘园, 陈飞, 等. 渗透处理结合热风干燥对桃脯干燥特性的影响 [J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(5): 165-174.
- [8] 关睿, 李琳, 王建辉, 等. 不同食盐添加量对冷藏草鱼品质的影响 [J]. 食品科学技术学报, 2020, 38(5): 100-108, 126.
- [9] 李晓, 王文亮, 王延圣, 等. 复合腌制剂对低盐腌渍生姜质构性质的影响 [J]. 中国调味品, 2019, 44(6): 109-113.
- [10] 张芸, 章蔚, 汪兰, 等. 木糖醇部分替代食盐腌制对大口黑鲈鱼品质的影响 [J]. 食品工业, 2020, 41(12): 82-86.
- [11] 郑曼. 不同预处理对罗非鱼片热泵干燥品质的影响 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2013: 38-40.
- [12] 商桑, 高伦江, 曾小峰, 等. 前处理方法在果蔬真空冷冻干燥中的应用研究进展 [J]. 南方农业, 2021, 15(28): 40-44.
- [13] 白竣文, 王吉亮, 肖红伟, 等. 基于 Weibull 分布函数的葡萄干燥过程模拟及应用 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 278-285.
- [14] 姚娜娜, 车凤斌, 张婷, 等. 不同预处理对提高大果沙棘热风干燥效果的对比分析 [J]. 现代食品科技, 2020, 36(8): 211-219, 22.
- [15] 崔清亮, 郭玉明, 郑德聪. 基于干燥动力学特性的冷冻干燥过程判别 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 124-127.
- [16] 刘书成, 张常松, 吉宏武, 等. 不同干燥方法对罗非鱼片品质和微观结构的影响 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 221-227.
- [17] CHEN H S, KONG B H, GUO Y Y, et al. The effectiveness of cryoprotectants in inhibiting multiple freeze-thaw-induced functional and rheological changes in the myofibrillar proteins of common carp (*Cyprinus carpio*) surimi[J]. Food Biophys, 2013, 8(4): 302-310.
- [18] 吴燕燕, 王悦齐, 沈颖莹, 等. 基于混菌发酵的鳊鱼发酵工艺优化与品质分析 [J]. 南方水产科学, 2022, 18(2): 105-114.
- [19] 崔燕, 宣晓婷, 林旭东, 等. 超高压协同冷冻辅助脱壳对南美白对虾肌原纤维蛋白理化性质的影响 [J]. 现代食品科技, 2019, 35(2): 32-39.
- [20] IHHAM C, PHILIPPE G, VERONIQUE S. Technical note: a simplified procedure for myofibril hydrophobicity determination[J]. Meat Sci, 2006, 74(4): 681-683.
- [21] PAN C, SUN K T, YANG X Q, et al. Insights on *Litopenaeus vannamei* quality deterioration during partial freezing storage from combining traditional quality studies and label-free based proteomic analysis[J]. J Food Compos Anal, 2022, 112(9): 104655.
- [22] 王阳. 不同预制条件和熟化方式对鲍鱼品质的影响 [D]. 大连: 大连工业大学, 2017: 35.
- [23] QIN N, ZHANG L T, ZHANG J B, et al. Influence of lightly salting and sugaring on the quality and water distribution of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) during super-chilled storage[J]. J Food Eng, 2017, 215(10): 104-112.
- [24] 吴亮亮, 罗瑞明, 孔丰, 等. 食盐添加量对滩羊肉蒸煮损失、嫩度及水分分布的影响 [J]. 食品工业科技, 2016, 37(2): 322-325, 366.
- [25] 李雨露, 刘丽萍. 提高肉制品保水性方法的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2012, 33(20): 398-400.
- [26] 周敏. 冷冻及烹调方式对脆肉鲩鱼肉品质的影响 [D]. 南昌: 江西科技师范大学, 2018: 33.
- [27] 刘静, 赵亚, 石启龙. 不同渗透剂预处理对扇贝柱热泵干燥动力学及品质特性的影响 [J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(3): 145-156.
- [28] CHALIDA N, SAKAMON D, SOMCHART S. Changes in protein compositions and their effects on physical changes of shrimp during boiling in salt solution[J]. Food Chem, 2007, 108(1): 165-175.
- [29] 李武强, 万芳新, 刘英, 等. 基于 Weibull 分布函数的胡萝卜切片远红外干燥过程模拟及应用 [J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(1): 204-212.
- [30] 张孙现. 鲍鱼微波真空干燥的品质特性及机理研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2013: 16-17.
- [31] 刘昊天, 殷小钰, 汪海棠, 等. 基于蛋白氧化行为的肉及肉制品品质提升及劣变机制研究进展 [J]. 食品科学, 2020, 41(21): 230-237.
- [32] ZENG P, RUAN Q, ZHANG Y S, et al. Effect of drying temperature and presalting methods on the quality and N-nitrosamine formation of dried mud carp (*Cirrhinus molitorella*)[J]. J Food

- Process Pres, 2018, 42: 1-9.
- [33] 韩珍琼, 马菁. 荷兰豆嫩莢干制品的生产工艺优选 [J]. 食品工业科技, 2011, 32(9): 329-332.
- [34] 邵颖, 王小红, 吴文锦, 等. 食盐添加量对预制鲈鱼冷藏保鲜及热加工特性的影响 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 280-286.
- [35] VALQUIRIA R, TATIANA K, XUE J, et al. Effects of high hydrostatic pressure processing parameters and NaCl concentration on the physical properties, texture and quality of white chicken meat[J]. Innov Food Sci Emerg, 2015, 30(6): 31-42.
- [36] 孟宇竹, 雷昌贵, 张旭伟. 腌制条件对咸肉色泽的影响 [J]. 肉类工业, 2012(8): 27-30.
- [37] YALCIN M Y, ŞEKER M. Effect of salt and moisture content reduction on physical and microbiological properties of salted, pressed and freeze dried turkey meat[J]. LWT, 2016, 68(5): 153-159.
- [38] 吴素娟, 颜小燕, 蒋志红, 等. 三种海鱼腌制过程中的理化性质及质构变化 [J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(1): 83-88.
- [39] 王春彦, 康壮丽, 马汉军, 等. 不同食盐添加量和蒸煮温度对猪肉糜品质的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(3): 194-198.
- [40] KRISTIN A T, SIGURJON A, SJOFEN S, et al. The effects of salt-curing and salting procedures on the microstructure of cod (*Gadus morhua*) muscle[J]. Food Chem, 2011, 126(1): 109-115.
- [41] YANG W X, SHI W Z, QU Y H, et al. Research on the quality changes of grass carp during brine salting[J]. Food Sci Nutr, 2020, 8(6): 2968-2983.
- [42] 杨鹏. 多脂红身鱼类鲭鱼在腌渍与干制加工中的品质变化及其控制技术的研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010: 50-53.
- [43] 黄彬, 徐玉娟, 唐道邦, 等. 反复冻融对不同卤制条件盐水鸡肉品质的影响 [J]. 食品科技, 2014, 39(1): 141-146.
- [44] FENG X C, CHEN L, LEI N, et al. Emulsifying properties of oxidatively stressed myofibrillar protein emulsion gels prepared with-epigallocatechin-3-gallate and NaCl[J]. J Agric Food Chem, 2017, 65(13): 2816-2826.
- [45] CHEN L, LI C Y, ULLAH N, et al. Different physicochemical, structural and digestibility characteristics of myofibrillar protein from PSE and normal pork before and after oxidation[J]. Meat Sci, 2016, 121(9): 228-237.
- [46] 沈春蕾, 张小利, 赵金丽, 等. 糖醇对冻藏南美白对虾的品质保障作用 [J]. 包装工程, 2019, 40(1): 15-23.
- [47] FENG X C, LI C Y, ULLAH N, et al. Potential biomarker of myofibrillar protein oxidation in raw and cooked ham: 3-Nitrotyrosine formed by nitrosation[J]. J Agric Food Chem, 2015, 63(51): 10957-10964.
- [48] PARVTHY U, SAJAN G. Influence of cryoprotectant levels on storage stability of surimi from *Nemipterus japonicus* and quality of surimi-based products[J]. J Food Sci Technol, 2014, 51(5): 982-987.
- [49] IGNACIO S, PEDRO C, PILAR M, et al. Protein and water structural changes in fish surimi during gelation as revealed by isotopic H/D exchange and Raman spectroscopy[J]. Food Chem, 2007, 106(1): 56-64.
- [50] 范露, 郭官清, 付宜萍, 等. 宣恩火腿加工过程中蛋白质相互作用力变化 [J]. 食品研究与开发, 2021, 42(13): 28-33.
- [51] 李晓燕, 郝淑贤, 李来好, 等. 热熏鲟鱼加工过程中的品质变化 [J]. 食品工业科技, 2015, 36(19): 73-77.
- [52] 卢彦宇. 高温处理对商业鱼糜凝胶及其复合凝胶性质的影响 [D]. 厦门: 集美大学, 2016: 3-6.
- [53] 周心雅, 贺稚非, 李洪军, 等. 酸碱度对兔肉肌原纤维蛋白功能性质的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(11): 172-179.
- [54] 游刚, 牛改改, 覃春雨. 凉粉草胶对罗非鱼糜凝胶特性和感官特性的影响 [J]. 食品科技, 2022, 47(3): 133-140.
- [55] 吴林洁, 张华毅, 洪梦蓉, 等. 腌制处理对养殖大黄鱼品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2018, 39(22): 35-40.
- [56] 齐宏超. NaCl 对脱水过程中猪肉特性变化的影响研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017: 8-11.
- [57] 杨晓娟. 开菲尔豆酸奶直投式发酵剂的研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2016: 5-6.